

# Paletli arazi taşıtlarının performans hesabında farklı bir yaklaşım

**Mustafa Nazım Emre ÖZDEĞER\*, Teoman KURTAY**

*İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Konstrüksiyon ve İmalat Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul*

## Özet

Günümüzde arazi taşıtlarının performans hesabında kullanılan ampirik-analitik Bekker yöntemi, zaman ve maliyet isteyen çok sayıda deney yapılmasını gerektirmektedir. Bu yöntemde zemin özellikleri, basit basma ve basit kesme deneyi olarak adlandırılan iki yükleme deneyine dayanarak belirlenmektedir. Pratikte geniş kullanım alanı bulmuş olan bu model, ampirik-analitik yapısı nedeniyle ciddi eleştirilere konu olmuştur. Zemindeki gerilme-deformasyon ilişkisi basit bağıntılarla ifade edilemez. Zemin basınç altında hem elastik hem de plastik deformasyona uğrar. Gerilme ve deformasyon arasındaki ilişki hem yükleme hem de boşaltma esnasında nonlineer karakterdedir. Bu nedenle zeminin mekanik davranışı gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkiyi temsil eden bünye denklemleriyle tanımlanmalıdır. Bu çalışma, paletli bir arazi taşıtının performansını kritik hal zemin mekaniği kavramlarından ve sonlu eleman yönteminden yararlanarak hesaplama hedefine yöneliktir. Performans hesaplarından önce basit basma ve basit kesme deneylerinin kuramsal-sayısal simülasyon modelleri oluşturulmuştur. Zeminin mekanik davranışının, kritik hal zemin özellikleri ile temsil edildiği bu modellerden yararlanılarak Bekker yaklaşımı ve kritik hal zemin mekaniği vasıtasıyla elde edilen sonuçlar arasındaki yakınsama araştırılmıştır. İki yaklaşımın ortaya koyduğu sonuçlar arasındaki benzerlik gözlenerek, Bekker katsayıları bilinen bir zemin tipi için kritik hal özellikleri tespit edilmiştir. Kritik hal özellikleri belirlenen zemin tipi üzerinde paletli bir arazi taşıtının yarattığı durumu yansıtan bir simülasyon oluşturulmuştur. Bu simülasyondan yararlanılarak bir M113 zırhlı personel taşıyıcısı paletinin, Detroit tını olarak sınıflandırılan bir zemin tipi üzerinde gösterdiği performans hesaplanmış, mevcut deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Arazi taşıtları, kritik hal zemin mekaniği, sonlu eleman yöntemi.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Mustafa N. E. ÖZDEĞER. [emredeger650@hotmail.com](mailto:emredeger650@hotmail.com); Tel: (216) 337 51 29.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Konstrüksiyon ve İmalat Programında tamamlanmış olan "Arazi taşıtları açısından toprağın mekanik davranışının modellenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 03.01.2006 tarihinde dergiye ulaşmış, 23.02.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2007 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## A new approach to predict the performance of tracked terrain vehicles

### Extended abstract

*In spite of the rapid progress in technology, systematic studies on off-road vehicles did not receive significant attention until the middle of the twentieth century. The work of Bekker and other colleagues pointed out the engineers in the right direction to look at traction systems systematically. By using empirical and analytical methods Bekker could manage to develop a model to predict the performance value for motion resistance and net traction.*

*Although there is a wide usage of Bekker's method in practice, many investigators accept that there are some unnegligible shortcomings of this method. The most important one of them is that the mechanical behaviour of soil can not be expressed without using convenient constitutive equations. The empirical equations which are the basic descriptions of Bekker's model are just mathematical expressions, which describe the change in the boundary conditions. Because the coefficients in these equations include the effect of the boundary conditions they can not reflect the soil properties independently.*

*With the widespread availability of high speed computing facilities and powerful engineering software, coupled with recent advances in soil mechanics and computational methods, theoretical and numerical simulation of machine-soil interaction has become feasible. In soil mechanical applications, stress-strain models (or constitutive equations) provide necessary information to the finite element process for predicting stress propagation and the resulting soil deformations. The accuracy of the finite element predictions, therefore, depends on the accuracy of the constitutive equations of the soil. It is therefore important to identify which constitutive equations provide the most appropriate basis for finite element simulation.*

*An important advance in soil mechanics is the development of the critical state soil mechanics as a theory, which allows us to determine the plastic deformation in soils within the limits of the theory of plasticity. The kernel of this theory is the concept that soil and other granular materials if continuously distorted until they flow as a frictional fluid, will come into a well-defined critical state. The critical state soil model is one step ahead than other ex-*

*isting soil stress-strain models because of its ability to represent the mechanical behaviour of soil accurately. The number of the parameters used in model implementation is a few. The physical meaning of these parameters is well defined and they are easy to measure.*

*In this study the performance of a tracked vehicle is predicted via a theoretical and numerical simulation model based on critical state soil mechanics, instead of using the empirical and analytical methods. The interaction between the track and soil for a M113 armoured personal carrier is numerically simulated using a critical state soil model, implemented on a general purpose finite element program Tochnog.*

*In empirical and analytical methods the soil properties are determined by two experiments, which are called as the simple pressure test and the simple shear test. Before modelling the track-soil interaction, finite element models which represent the simple pressure test and the simple shear test are developed. Critical state properties for soil are calibrated by watching the convergence between the results obtained from the empirical equations and from the finite element method.*

*The performance of the track is presented as a function of slip and compared with available experimental data in the literature. The tests were performed on Detroit loam in two different moisture contents. In moist and medium wet loam the results of the Bekker model represent the upper bound of the data band at slip less than 10 percent. At slip greater than 10 percent the Bekker results overestimate the performance between 30 and 40 percent.*

*The results of the theoretical and numerical simulation are in good agreement with experimental data. In moist loam they represent the upper bound of the data band at slip less than 5 percent. At slip between 5 and 18 percent they are in the data band. At slip greater than 18 percent the results represent the lower bound of the data band. In medium wet loam they represent the upper bound of the data band at slip less than 5 percent. At slip between 5 and 25 percent they are in the data band. At slip greater than 25 percent the results represent the lower bound of the data band.*

**Keywords:** Terrain vehicles, critical state soil mechanics, finite element method.

## Giriş

Yol dışı hareket mekaniği alanında kazanılan bilgi ve tecrübelerin genel çerçevesi, İkinci Dünya Savaşı esnasında ve bunu takip eden yıllarda Bekker tarafından ortaya konulmuştur (Bekker, 1956). Bu çalışmalarda zemin özellikleri ampirik yöntemlerle tespit edilerek, taşıt performansını belirlemede önemli bir yer tutan seyir direnci ve cer kuvveti büyüklüklerini ve çeşitli zemin tipleri için palet veya tekerlek gibi yürüme düzeneklerinin rasyonel boyutlarını hesaplamak için kullanılan bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşım birçok araştırmacı tarafından arazi taşıtlarının çeki performansını hesaplamak amacıyla kullanılmıştır (Ma ve Perkins, 1999; Le, 1999; Apostolopoulos, 2001; Shmulevich ve Osetinsky, 2003; Shibly vd., 2005).

Bu yaklaşım ampirik-analitik yapısı nedeniyle ciddi eleştirilere konu olmuştur (Kurtay, 1970; Kurtay ve Reece, 1970; Kurtay, 1975). Zemindeki gerilme-deformasyon ilişkisi basit bağıntılarla ifade edilemez. Zemin basınç altında hem elastik hem de plastik deformasyona uğrar. Gerilme ve deformasyon arasındaki ilişki hem yükleme hem de boşaltma esnasında nonlinear karakterdedir. Bu nedenle zeminin mekanik davranışı gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkiyi temsil eden bünye denklemleriyle tanımlanmalıdır.

Zemindeki gerilme-deformasyon ilişkisini tanımlayan modeller nonlinear elastik ve elasto-plastik olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir (Chi vd., 1993). Nonlinear modellere örnek olarak hiperbolik model, hiperelastik model ve Bailey modeli gösterilebilir. Kritik hal modeli, kep modeli ve Lade modeli ise elasto-plastik modeller kategorisine girer.

Analitik metotlarla kıyaslandığında, sonlu eleman yönteminin sonuçlara hızlı bir şekilde ulaşmayı sağlayan güçlü bir sayısal yöntem olduğu görülmektedir. Bu yöntemle elde edilen sonuçların doğruluğu ise yöntemin hangi zemin modeliyle birlikte kullanıldığına bağlıdır. Tercih edilen model her şeyden önce zeminin mekanik davranışını doğru şekilde temsil etmelidir. Aynı

zamanda bu model kolay ölçülebilen tipte az sayıda parametre içermelidir. Tüm bu özellikler göz önünde bulundurulduğunda kritik hal zemin modelinin diğer modeller arasında öne çıktığı görülmektedir. Sayısal hesap yöntemleriyle birlikte kullanıldığında kritik hal zeminin plastik davranışını başarılı bir şekilde ortaya koyduğu görülmüştür (Cheng vd., 2002).

Bu çalışmada, paletli bir aracın Detroit tını olarak adlandırılan bir zemin tipi üzerinde sergilediği performans, kritik hal zemin özelliklerinin kullanıldığı ve sonlu eleman yönteminin uygulandığı kuramsal-sayısal bir simülasyon modeliyle hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar mevcut deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Palet ve zemin arasındaki etkileşimi yansıtan simülasyon modeli genel amaçlı bir sonlu eleman programı olan Tochnog vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

## Bekker'in ampirik-analitik yaklaşımı

Bekker'in ampirik-analitik yaklaşım modeli, zemin üzerinde yapılan iki basit yükleme deneyi sonucuna dayanır. Bu deneylerde düz, katı, dik-dörtgen plakalar kullanılarak başlangıçta yürüme düzeneğine göre daha basit yapılardan yola çıkılarak problem çözülür.

Basit basma deneyi olarak adlandırılan birinci deneyde plaka toprağa düşey bir kuvvetle bastırılır. Plaka üstündeki basınç ( $p$ ) ile plakanın batma miktarı ( $z$ ) arasındaki değişim ampirik (1) denklemiyle ifade edilir:

$$p = (k_c / b + k_\phi) z^n \quad (1)$$

Burada,  $k_c$ ,  $k_\phi$  ve  $n$ , zemin tipini tanımlayan ampirik katsayıları,  $b$  ise basma plakasının genişliğini ifade etmektedir. Sırasıyla  $k_c$  ve  $k_\phi$  kohezif ve sürtünme modülü,  $n$  ise deformasyon üssü olarak adlandırılır.

Basit kesme deneyi olarak adlandırılan ikinci deneyde plaka önce düşey olarak yüklenir. Üstündeki basınç istenilen seviyeye geldiğinde plaka yatay olarak hareket ettirilir ve toprağı kesilmeye zorlar. Temas alanında zeminin kay-

ma gerilmesi ( $\tau$ ) ile kayma yer değiştirmesi ( $j$ ) arasındaki bağıntı (2) numaralı denklemle ifade edilir:

$$\tau = (c + \sigma \tan \phi) (1 - e^{-j/K}) \quad (2)$$

Burada  $c$  zeminin kohezyonu,  $\phi$  zeminin iç sürtünme açısı,  $\sigma$  normal gerilme,  $K$  ise zemin tipine bağlı olarak değişen ve en büyük kayma gerilmesini elde etmek için gerekli olan yer değişimi büyüklüğünü ifade eden ampirik kesme deformasyon katsayısı olarak tanımlanmaktadır.

Bekker sisteminin çıkış noktası olan basit basma ve basit kesme deneyleri sonucunda elde edilen denklemler, temas alanı geometrisi ve yükleme tipindeki değişimleri gösteren yaklaşık matematik ifadelerdir. Bu denklemlerdeki katsayılar bu değişimlerin etkilerini de içerdikleri için zemin özelliklerini bağımsız olarak yansıtamamaktadır. Yapılan sistematik deneyler bu katsayıların deney plakasının şekline, boyutlarına ve yüklenmesine bağlı olduğunu açıkça göstermiştir (Onafeko ve Reece, 1967).

(1) numaralı bağıntı ile ancak duran bir aracın statik batması hesaplanabilir. Hâlbuki arazi taşıtları zemin üstündeki hareketleri esnasında dayanma alanında yatay kuvvet ve deformasyonlar oluşturmakta ve bu yatay yükleme ilave batma meydana gelmesine neden olmaktadır. Kayma batması olarak adlandırılan bu ilave batmaya Bekker sistemi açıklama getirememiştir.

### Kritik hal zemin mekaniği

Kritik hal zemin mekaniği, zeminta meydana gelen plastik deformasyonları plastisite teorisi içinde ilk defa hesaplama imkanını sunan bir teoridir. Bu teori, zemin ve diğer tanecikli malzemelerin sürekli olarak deforme edilmeleri halinde, sürtünmeli bir sıvı şeklinde akacakları kritik bir hale gireceklerini öne sürer (Schofield ve Wroth, 1968). Bu kritik hal aşağıdaki iki denklemle ifade edilebilir:

$$Q = M P \quad (3)$$

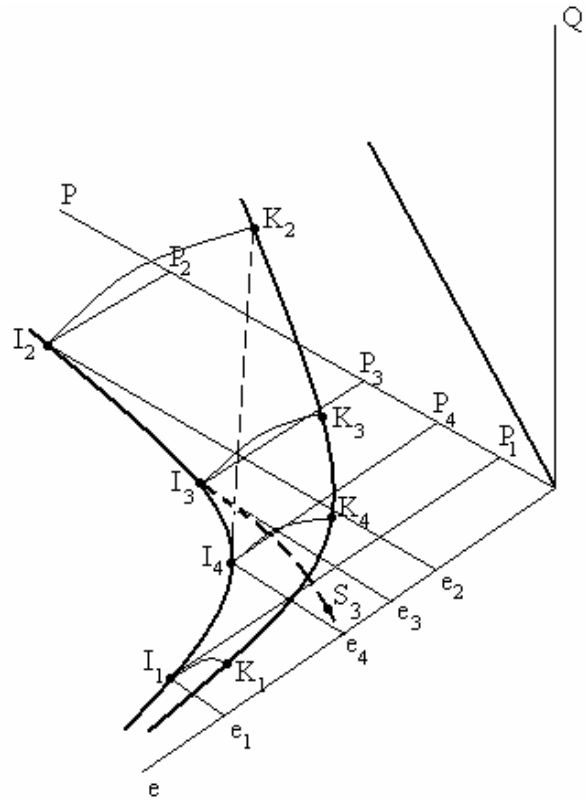
$$e = e_k - \lambda \ln (P/P_k) \quad (4)$$

Burada,  $Q$  biçim değiştirme gerilmesi,  $P$  hidrostatik basınç,  $M$  kritik hal eğrisinin eğimi,  $e$  zemindeki boşluk oranı,  $(e_k, P_k)$  kritik hal eğrisi üzerinde bilinen bir noktanın koordinatları,  $\lambda$  plastik sıkışma özelliğini gösteren bir sabittir. Hidrostatik basınç ve biçim değiştirme gerilmesinin, asal gerilmeler cinsinden ifadesi aşağıdadır:

$$P = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (5)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

Kritik hal zemin mekaniğinin ana kavramları, yukarıdaki anlatımlar temel alınarak birbirine dik  $P$ ,  $Q$  ve  $e$  eksenlerinin meydana getirdiği uzayda tanımlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1.  $(P, Q, e)$  uzayında kritik hal özellikleri

$P$ ,  $Q$ ,  $e$  arasındaki bağıntılar üç eksenli deney aleti yardımıyla belirlenebilir. Silindirik zemin numunesi bir lastik kılıf içerisinde deney hücre-sine yerleştirilir. Hücre su ile doludur. Hücrede-

ki su basıncı ile zemin numunesi üzerindeki hidrostatik basınç ve eksen üzerine uygulanacak bir kuvvet ile de biçim değiştirme gerilmesi değiştirilebilir. Bu şekilde uygulanan yükleme deneyleri neticesinde kritik hal modeliyle ilgili tüm zemin özelliklerini kolaylıkla tespit etmek mümkündür.

Başlangıçta zemin örneği mümkün olduğu kadar gevşek hazırlanmış olsun. Zeminin bu hali, Şekil 1’de  $I_1$  noktası ile temsil edilebilir. Şimdi hücre basıncı artırılırsa zeminin boşluk oranı  $I_1I_2$  eğrisi boyunca azalacaktır; buna ilk sıkışma eğrisi (İSE) denir. İlk sıkışma eğrisi üzerindeki  $I_3$  noktasında hücre basıncı azaltılırsa boşluk oranı  $I_3S_3$  eğrisi boyunca artar; bu eğriye şişme eğrisi (ŞE) veya elastik sıkışma eğrisi denir. İlk sıkışma eğrisi,

$$e = e_1 - \lambda \ln \frac{P}{P_1} \quad (7)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada ( $e_1$ ,  $P_1$ ) ilk sıkışma eğrisi üzerinde bilinen bir noktanın koordinatları,  $\lambda$  zeminin plastik sıkışma özelliği ile ilgili bir sabittir.

Benzer bir şekilde şişme eğrisi de,

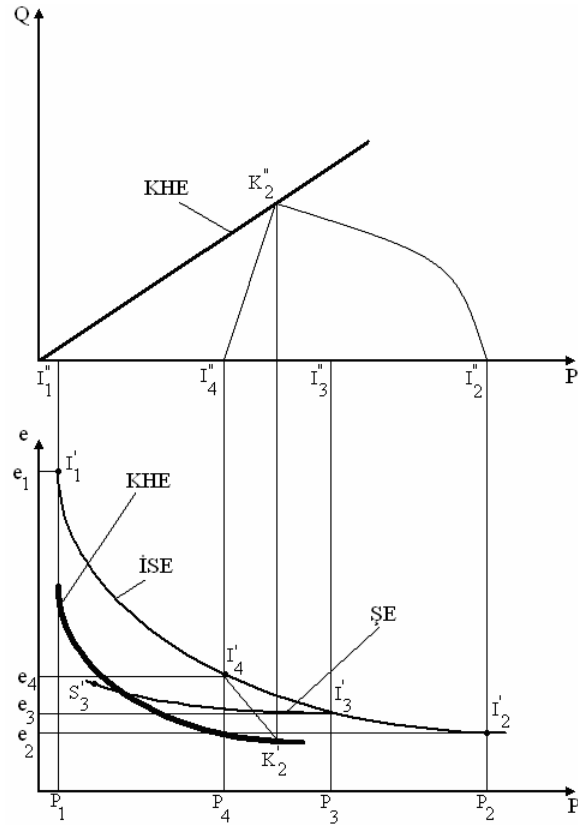
$$e = e_3 - \kappa \ln \frac{P}{P_3} \quad (8)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Burada  $\kappa$ , zeminin elastik sıkışma özelliği ile ilgili bir sabit, ( $e_3$ ,  $P_3$ ) ise şişme eğrisinin ilk sıkışma eğrisini kestiği noktanın koordinatlarıdır.

Şimdi ilk sıkışma eğrisi üzerindeki  $I_4$  noktasından itibaren eksenel kuvvet uygulandığını düşünelim. Bu taktirde boşluk oranı  $I_4K_2$  hal izi boyunca azalır. Nihayet  $K_2$  noktasında gerilme parametreleri  $P$ ,  $Q$  ve  $e$  artık değişmez; bu hale kritik hal denir. Kritik halde zemindeki boşluk oranı ( $e$ ) ve gerilme durumu ( $P, Q$ ) sabit kalır fakat biçimi sürekli olarak değişir, yani zemin sürekli akma haline geçer.

İSE’nin farklı noktalarından başlamak üzere yukarıdakine benzer bir seri deney yapılırsa, de-

neyler esnasında  $P, Q$  ve  $e$ ’nin değişimleri, bir eğri ile sınırlanan bir yüzey meydana getirir. Bu yüzeye plastik hal yüzeyi ve kritik hal noktalarını birleştiren sınır eğrisine de kritik hal eğrisi (KHE) denilir. Plastisite teorisine göre bunlardan birincisi pekleşme şartlarını gösteren bir akma yüzeyi, ikincisi sürekli akma halini ifade eden bir sınır eğridir. Kritik hal eğrisi ( $e, \ln P$ ) düzleminde ilk sıkışma eğrisine paralel bir doğrudur. Şekil 2’ de ( $P, Q$ ) ve ( $P, e$ ) düzlemlerinde İSE, ŞE ve KHE yer almaktadır.



Şekil 2. ( $P, Q$ ) ve ( $P, e$ ) düzlemlerinde İSE, ŞE ve KHE

İlk sıkışma eğrisi ile kritik hal eğrisi arasındaki plastik hal yüzeyi, zeminin boşluk oranı sabit kalmak şartıyla yapılan deneylerle de elde edilebilir. Suya doymuş zeminlerde yapılan hızlı, akışsız deneyler bu şartı sağlar ve deneyler sonucunda  $I_4K_4$  hal izine benzeyen eğriler elde edilir. Hangi noktadan başlanırsa başlansın bütün deneyler kritik hal eğrisi üzerinde son bulur ve hiçbir hal değişimi plastik hal yüzeyini aşmaz.

Sıkışabilen zeminta deformasyon hesabı için plastik hal yüzeyinin denklemi, yani potansiyel fonksiyonu bilinmelidir. Plastik hal yüzeyinin eliptik bir yüzey olduğu kabulü esas alınarak potansiyel fonksiyonunun denklemi (9) bağıntısıyla verilebilir. Burada  $P_v$ , ilk sıkışma eğrisi üzerinde zeminin başlangıçtaki boşluk oranını belirler. Plastisite teorisindeki normallik şartı ve akış ilkesi yardımıyla deformasyon değişimlerinin bütün bileşenleri hesaplanabilir (Calladine, 1969).

$$F(P, Q, P_v) = P + \frac{Q^2}{M^2 P} - P_v \quad (9)$$

### Plaka deneylerinin kuramsal-sayısal yaklaşımla modellenmesi

Bu çalışmada öncelikle basit basma ve basit kesme deneyleri ile ilgili kuramsal-sayısal simülasyon modelleri oluşturulmuştur. Zeminin mekanik davranışının, kritik hal zemin özellikleri ile temsil edildiği bu modellerden yararlanılarak Bekker yaklaşımı ve kritik hal zemin mekanik vasıtasıyla elde edilen sonuçlar arasındaki yakınsama araştırılmıştır. İki yaklaşımın ortaya koyduğu sonuçlar arasındaki olumlu yakınsama, plaka deneylerinin simülasyon modelleri vasıtasıyla, Bekker katsayıları bilinen bir zemin tipi için kritik hal zemin özelliklerini tespit etmenin mümkün olduğunu göstermiştir.

Basit basma deneyinin simülasyon modeli aracılığıyla, Detroit tınının iki farklı nemlilik durumu için, rijit düz bir plaka üzerindeki basınç ( $p$ ) ve buna karşılık gelen batma değeri ( $z$ ) grafiğe taşınarak kritik hal modelinin ortaya koyduğu basınç-batma eğrileri çizilmiştir.

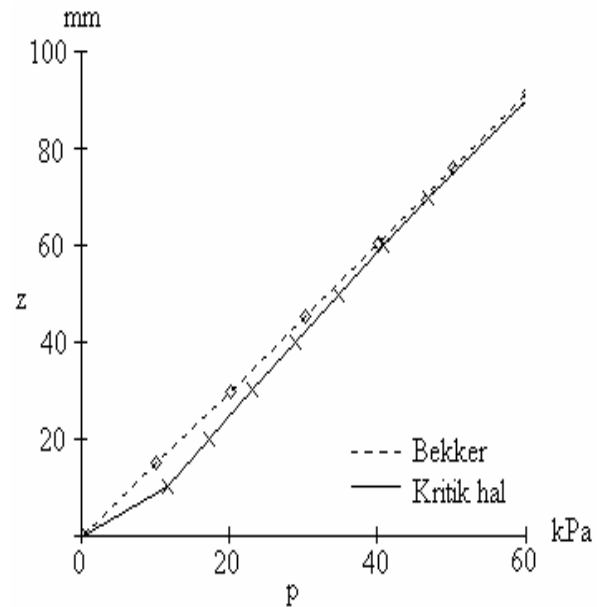
Doğru eğriyi, dolayısıyla doğru kritik hal özelliklerini belirlemek için başlangıçta zemin özellikleriyle ilgili bir tahminde bulunulmuş, sonraki aşamalarda başlangıç şartları ( $P_v, e_v$ ),  $\lambda$  ve  $\kappa$  değiştirilerek elde edilen eğriler, (1) bağıntısıyla verilen Bekker denkleminin ortaya koyduğu eğriyle aynı grafiğe taşınarak yakınsama durumları karşılaştırılmıştır (Şekil 3-4). İki eğri arasındaki farklar gözlenerek belli bir yakınsama sağlanana

kadar değerlerde değişikliğe gidilmiş ve alınan en yakın sonuç en son grafiğe taşınarak bu eğriyi ortaya koyan büyüklüklerin, üzerinde çalışılan zemin tipi için geçerli olan kritik hal zemin özellikleri olduğu varsayılmıştır.

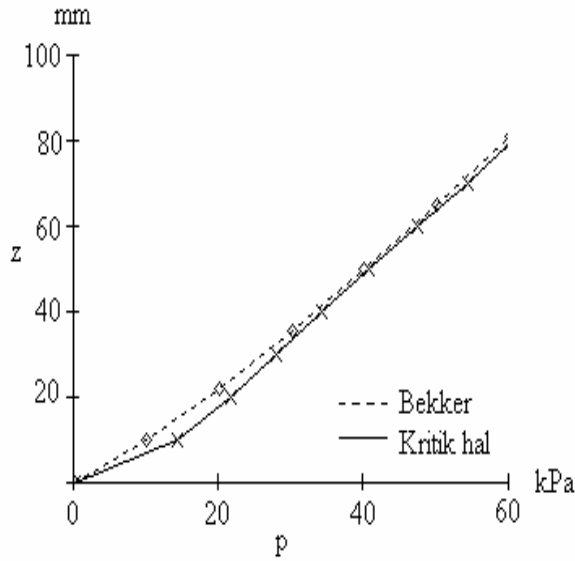
Basit basma deneyinin simülasyon modeli yardımıyla, kritik halde sürtünme özelliği  $M$  haricinde zeminin tüm kritik hal özellikleri belirlenmiştir. Kritik halde sürtünme özelliği  $M$ , zeminin iç sürtünme açısı  $\phi$  cinsinden ifade edilebilir (Stankiewicz ve Pamin, 2002). Aşağıda yer alan (10) numaralı bağıntı bu iki değişken arasındaki ilişkiyi göstermektedir:

$$M = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi} \quad (10)$$

Bu bağıntının Detroit tını için ortaya koyduğu  $M$  değeri, basit kesme deneyinin simülasyon modelinde yerine konularak iç sürtünme açısı hesaplanmıştır. Başlangıçta yola çıkılan  $\phi$  değeri ile simülasyon modelinin ortaya koyduğu  $\phi$  büyüklüğünün aynı olduğu görülerek, (10) bağıntısı ile elde edilen  $M$  değeri Detroit tınının kritik halde sürtünme özelliğini yansıtan gerçek değer olarak varsayılmıştır.



Şekil 3. Nemli tın basınç-batma eğrisi



Şekil 4. Orta ıslak tın basınç-batma eğrisi

Bu şekilde tüm kritik hal zemin özellikleri belirlenmiştir. Tablo 1’de Detroit tınına ait Bekker katsayıları ve bunlardan yola çıkılarak tespit edilen kritik hal zemin özellikleri yer almaktadır.

Tablo 1. Detroit tını Bekker katsayıları ve kritik hal zemin özellikleri

Parametre	Nemli Tın	Orta Islak Tın
Bekker katsayıları		
Nem oranı	% 8-9	%13-14
N	0.98	0.84
$k_c$ (kN/m <sup>n+1</sup> )	45	34.5
$k_\phi$ (kN/m <sup>n+2</sup> )	505	407
c (kPa)	1.38	1.725
$\phi$ (°)	32	34
Kritik hal zemin özellikleri		
Nem oranı	% 8-9	%13-14
$P_v$ (kPa)	3	4
$e_v$	1.1	1.15
$\lambda$	0.015	0.02
$\kappa$	0.003	0.004
M	1.29	1.375

### Palet performansının analizi

Bu çalışmada palet performansı hesaplanırken sonlu eleman yöntemi kullanılmış ve paletin etkileşimde bulunduğu zeminin mekanik özellik-

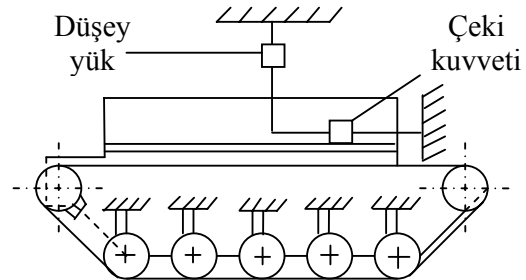
leri kritik hal zemin mekaniği teorisine göre tanımlanmıştır. Palet hareketinin kuramsal-sayısal simülasyonu oluşturularak batma ve kayma miktarları ve bunlara bağlı olarak meydana gelen gerilme değerleri belirlenmeye çalışılmış, belirlenen bu değerlerden yola çıkılarak seyir direnci ve cer kuvveti büyüklükleri hesaplanmıştır.

Bekker yönteminde sadece statik batma nedeniyle meydana gelen seyir direnci R hesaplanabilirken simülasyon modeli kayma batması nedeniyle oluşan ilave seyir direnci  $R_i$ ’yi de hesaplama imkanı vermektedir. Cer kuvveti ile toplam seyir direnci  $R_t$  arasındaki fark kısaca çeki kuvvetini belirler.

$$R_t = R + R_i \quad (11)$$

$$F_c = F_c - R_t \quad (12)$$

Simülasyon sonuçlarının geçerliliğini sınamak amacıyla Michigan’daki A.B.D Tank Otomotiv Kumanda Merkezi, Hareketli Sistemler Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olan deney sonuçları ile aynı koşullar altında elde edilen simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneyler Şekil 5’te gösterilen deney düzeneği ile 2.66 m uzunluğunda 0.38 m genişliğinde bir temas alanına sahip bir M113 zırhlı personel taşıyıcı paleti için Detroit tınında nemli ve orta ıslak olmak üzere iki farklı nem durumuna göre gerçekleştirilmiştir (Chang ve Baker, 1973).



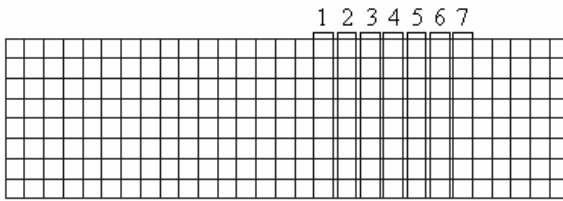
Şekil 5. Çeki kuvveti deney düzeneği

Paletin zemine sebep olduğu kayma ve çökme hareketleri 38 cm uzunluğunda 7 adet rijit plakayla modellenmiştir. Plakayı ve toprağı temsil

eden elemanlar arasındaki bağlantı, düğüm noktaları arasında yer alan ara elemanlarla sağlanmıştır. Bu elemanlar rijit olarak seçilmiş böylece plakanın uyguladığı kuvvetin değişikliğe uğramadan toprağa yansıtılması sağlanmıştır. Rijit plakalar zeminle temas süreleri birbirinden farklı olan 7 pabuç parçasını temsil etmektedir. Her bir pabucun zeminde meydana getirdiği kayma ve buna bağlı batma miktarları farklıdır.

Çözüm bölgesinin sağ ve sol kenarlarında yalnız yatay yer değişimleri, tabanında ise hem yatay hem de düşey yer değişimleri sınırlandırılmıştır. Çözüm bölgesi için 10 m genişliğinde 3 m derinliğinde bir alan seçilmiş, pabuçlara bu mesafedeki sınır noktalarının çözüme etkilerinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu kabul edilmiştir.

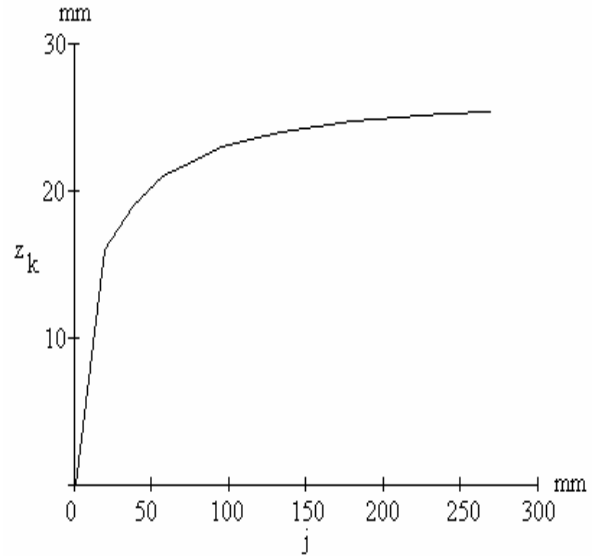
Şekil 6’da gösterilen 1 numaralı pabuç paletin zeminle ilk temasa giren kısmını temsil etmektedir. Pabuç belli bir süre hem düşey olarak yüklenmekte hem de yatay olarak hareket etmektedir. Düşey yükleme istenen seviyeye geldiğinde durmakta, pabucun yatay hareketi ise ön görülen kayma yer değiştirmesine ulaşıncaya kadar devam etmektedir. İlk pabucun düşey yüklemesi tamamlandığında ikinci pabuç hareketine başlar. Bu hareket planı tüm pabuçlar için önceden belirlenen taşıt ağırlığı ve kayma oranı büyüklükleri temel alınarak gerçekleştirilir.



Şekil 6. Simülasyonda kullanılan ağ yapısı

Simülasyon modelinde toplam seyir direncini hesaplamak için taşıt ağırlığı ve kayma hareketi nedeniyle paletin zeminle temas ettiği alan boyunca meydana gelen batma ve buna karşılık gelen basınç değerleri bilinmelidir. Bekker yaklaşımında hesaplanamayan ilave batma değeri simülasyon modeli yardımıyla hesaplanabilmektedir. Şekil 7’de simülasyon modelinin nemli

Detroit tını için ortaya koyduğu kayma batması eğrisi yer almaktadır.



Şekil 7. Nemli Detroit tınında kayma batması eğrisi

Düzgün basınç dağılımının söz konusu olduğu hallerde her pabuç üstündeki basınç, dolayısıyla pabuçların batma miktarı aynıdır. Pabuçlardaki kaymaya bağlı batma miktarları ise farklıdır. Her pabucun zeminle temas süresi, dolayısıyla sebep olduğu kayma yer değiştirmesi farklı değerde olduğu için toplam seyir direnci  $R_t$  hesaplanırken paletin ortalama batma değeri  $z_a$  ve bu batma değerine karşılık gelen basınç büyüklüğü esas alınarak hesaplama yapılmıştır. (13) numaralı denklem toprağı sıkıştırarak b genişliğinde, l uzunluğunda ve  $z_a$  derinliğinde bir iz meydana getirmek için gerekli olan iş miktarını ortaya koymaktadır.

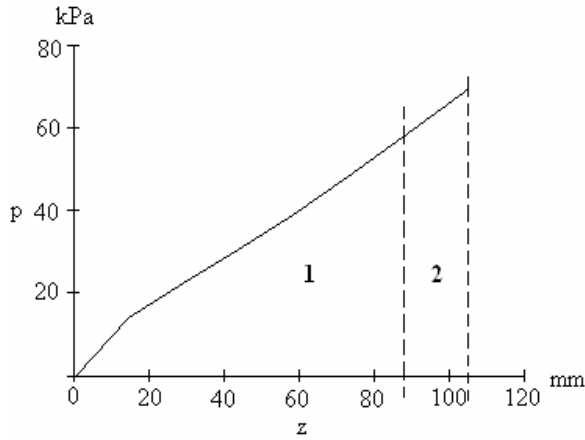
$$İş = bl \int_0^{z_a} pdz \quad (13)$$

Paletin yatay yönde l uzunluğu kadar çekildiğini düşünelim. Bu sırada sarf edilen enerji, l uzunluğunda bir iz oluşturmak için gerekli olan ve (13) bağıntısı ile ifade edilmiş olan düşey iş miktarına eşit olur. Böylece sıkışmadan dolayı meydana gelen toplam seyir direnci (14) numaralı bağıntı ile ifade edilir.



$$R_t = b \int_0^{z_a} p dz \quad (14)$$

Şekil 8, M113 paleti ile 58 kPa zemin basıncında, %5 kayma oranında nemli Detroit tını için elde edilen basınç-batma değerlerini vermektedir. Simülasyon sonucunda elde edilen ortalama batma değeri  $z_a$  105 mm büyüklüğündedir. Basınç-batma eğrisi altında kalan alan hesaplanarak palet genişliği ile çarpıldığında (14) bağıntısı ile ifade edilen toplam seyir direnci tespit edilir. Şekildeki 1 numaralı alan statik batma nedeniyle oluşan seyir direncinin, 2 numaralı alan ise ilave seyir direncinin toplam direnç içindeki payını temsil etmektedir.



Şekil 8. %5 kayma halinde basınç-batma eğrisi

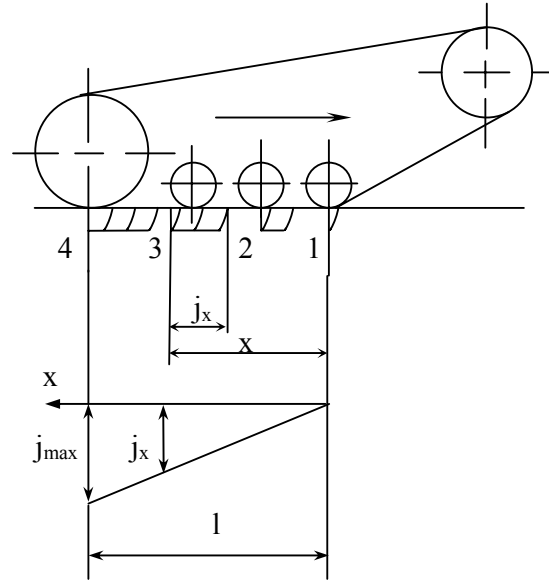
Bekker palet sisteminin rijit bir taban oluşturduğunu varsayarak seyir direncini belirlemek için basit basma deneyi sonuçlarından yararlanmıştır. Bu deney yardımıyla toprağı tanımlayan katsayıları tespit etmiş, seyir direncini ise (14) numaralı bağıntı yardımıyla hesaplamıştır. Burada yer alan  $p$  basıncı (1) numaralı ampirik bağıntıyla tanımlanarak integral hesabı gerçekleştirilmiştir. Bekker bu şekilde statik batma halinde oluşan direnç kuvvetini tespit etmiş fakat paletin kayması esnasında oluşan ilave batma nedeniyle meydana gelen ilave seyir direncini hesaba katmamıştır (Wong, 1993).

Cer kuvveti hesabında ise esas olan palet altındaki kayma gerilmesi dağılımının tespit edilmesidir. Bunun için kayma yer değiştirmesinin pa-

let altındaki gelişimini incelemek gerekir. Çünkü kayma gerilmesi kayma yer değiştirmesinin bir fonksiyonudur. Bir palet altındaki çeşitli noktalarda meydana gelen kayma yer değiştirmesi Şekil 9'da gösterilmiştir.

Şekildeki 1 numaralı noktada bulunan palet tırnağı zeminle yeni temasa geçtiğinden diğer noktalarla aynı kayma yer değiştirmesini oluşturmaz. Toprağı bir süredir kesmekte olan 2, 3, ve 4 numaralı noktalar temasta bulundukları süreyle orantılı olarak farklı kayma yer değiştirmesi büyüklüklerine sebep olurlar. Zemindeki kayma yer değiştirmesi  $j$ , temas uzunluğu boyunca artar ve temas alanının arka kısmında maksimum değerine ulaşır. Palet altında kayma yer değiştirmesinin gelişimini incelemek için öncelikle paletteki kayma oranı  $i$  tespit edilmelidir:

$$i = 1 - \frac{V}{r\omega} = 1 - \frac{V}{V_t} = \frac{V_t - V}{V_t} = \frac{V_j}{V_t} \quad (15)$$



Şekil 9. Palet altında kayma yer değiştirmesinin gelişimi

Burada  $V$  paletin ileriye doğru gerçek hızı,  $V_t$  açısal hız  $\omega$  ve yarıçap  $r$  kullanılarak tespit edilen teorik hız,  $V_j$  ise paletin zemine göre kayma hızını temsil etmektedir. Araç kayarken  $V_j$  taşıt hareketine ters yöndedir. Palette uzama olamayacağı için  $V_j$  paletin zeminle temasta bulunan

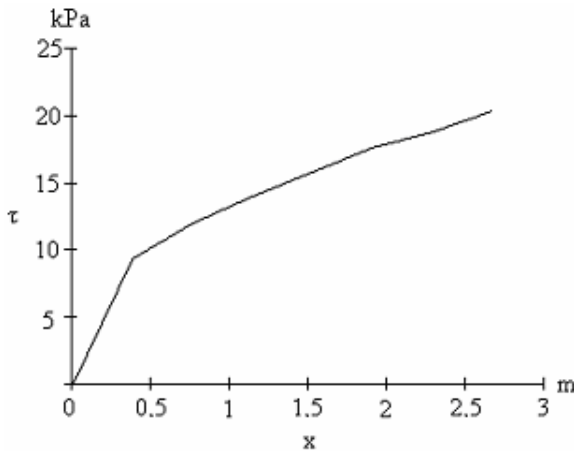
her noktası için aynıdır. Temas alanının ön tarafından  $x$  kadar uzakta bulunan bir noktadaki kayma yer değiştirmesi, (16) numaralı bağıntı ile belirlenebilir:

$$j = V_j t \quad (16)$$

Burada  $t$  söz konusu noktanın zeminle temasta bulunduğu süreyi temsil eder ve  $x/V_t$ 'ye denktir. (16) bağıntısı yeniden düzenlenirse  $j$  için aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$j = \frac{V_j x}{V_T} = ix \quad (17)$$

Palet performansını hesaplamak için oluşturulan kuramsal-sayısal simülasyon modelinde kullanılan plakalar palet pabuçlarını temsil etmektedir. Şekil 6'da yer alan bir numaralı plaka, zeminle ilk temas eden ve simülasyon sonunda temas alanının arkasına ulaşan palet pabucunu göstermektedir. Pabuçlar düşey olarak yüklenir ve (17) bağıntısından yararlanılarak hesaplanan kayma yer değiştirmesi büyüklükleri kadar hareket ettirilir. Simülasyon sonunda her pabuç altında zeminta meydana gelen kayma gerilmesi değeri okunur. Temas alanı boyunca meydana gelen kayma gerilmesi dağılımı bu şekilde tespit edilerek  $x$ - $\tau$  eksen takımına taşınır. Şekil 10'da nemli Detroit tınında M113 paleti için 58 kPa zemin basıncında, %5 kayma oranında simülasyon modeli ile elde edilen kayma gerilmesi dağılımı yer almaktadır.



Şekil 10. %5 kayma halinde gerilme dağılımı

Kayma gerilmesi eğrisi altında kalan alan palet genişliğiyle çarpıldığında (18) bağıntısı ile ifade edilebilecek olan toplam cer kuvveti büyüklüğü elde edilir.

$$F_c = b \int_0^l \tau dx \quad (18)$$

Bekker yaklaşımında da cer kuvveti (18) numaralı bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır. Bekker modelinde kayma gerilmesi ( $\tau$ ), kesme deneyleri yardımıyla belirlenen ampirik (2) bağıntısıyla tanımlanmıştır.

### Simülasyon sonuçları

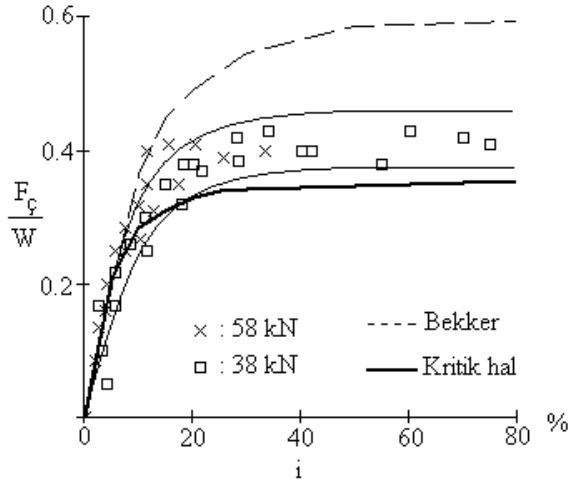
Her biri 0.38 m uzunluğunda 7 adet pabuç modellenerek, 58 kPa büyüklüğünde bir zemin basıncı için, nemli ve orta ıslak Detroit tınında gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen taşıt performansı eğrileri, 58 kN ve 38 kN normal yük için elde edilen deney sonuçları ve Bekker katsayılarının ortaya koyduğu eğrilerle karşılaştırılmıştır (Şekil 11-12).

Şekil 11 ve Şekil 12'de M113 paleti kullanılarak elde edilen deney sonuçları, alt ve üst sınırlarını gösteren iki eğri ile bir bant içine alınmıştır. Burada çarpı işareti ile gösterilen sonuçlar 58 kN normal yük altında, kare işareti ile gösterilen sonuçlar ise 38 kN yük altında elde edilmiştir. Bekker katsayılarının ortaya koyduğu eğri, nemli ve orta ıslak Detroit tınlarında %10 kayma oranına kadar üst sınırı teşkil eden değerleri takip etmiş, daha yüksek kayma oranlarında ise çeki kuvvetinin değerini aşırı yüksek ön görmüştür.

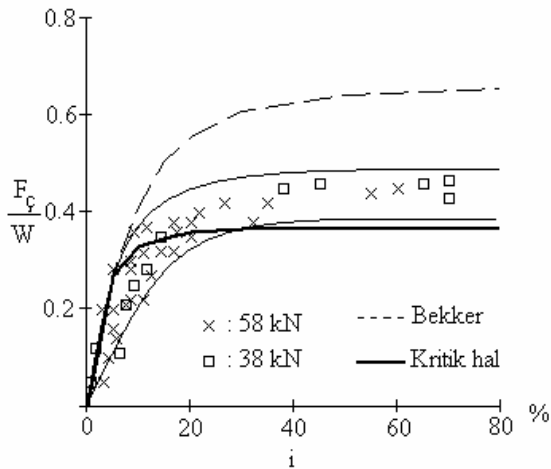
Kritik hal zemin özellikleri kullanılarak oluşturulan simülasyon modeli ise nemli Detroit tınında %5 kayma oranına kadar üst sınırı teşkil eden değerleri takip etmiş, kayma oranı %5'ten %18'e gelene kadar bant sınırları içinde kalmış, kayma oranının daha da artmasıyla çeki kuvvetinin değerini olduğundan düşük fakat alt sınıra yakın olarak ortaya koymuştur. Orta nemli Detroit tınında ise yine %5 kayma oranına kadar üst sınırı teşkil eden değerleri takip etmiş, kayma oranı %5'ten %25'e gelene kadar bant sınırları

içinde kalmış, kayma oranının daha da artmasıyla çeki kuvvetinin değerini yine olduğundan düşük fakat alt sınıra yakın olarak ortaya koymuştur.

Detroit tını için nem oranı %13.7'ye geldiğinde plastiklik sınırı başlamaktadır. İki farklı nem oranı için elde edilen sonuçlar kritik hal zemin özellikleri kullanılarak oluşturulan simülasyon modelinin plastik bölgede daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir.



Şekil 11. Nemli tında elde edilen palet performans eğrisi



Şekil 12. Orta ıslak tında elde edilen palet performans eğrisi

## Sonuçlar

Basit basma ve basit kesme deneylerinin simülasyon modelleri vasıtasıyla Bekker katsayıları bilinen bir zemin tipine ait kritik hal zemin özellikleri başarıyla tespit edilebilmiştir. Bu şekilde ampirik-analitik Bekker yöntemi yerine seçtiğimiz sayısal kuramsal yaklaşımın, arazi taşıtlarının zemin üstünde meydana getirdiği etkiyi araştırmaya uygun olduğu görülmüştür. Temas alanı geometrisi ve yükleme tipinden etkilenen değişken boyutlu Bekker katsayıları yerine, fiziksel anlam taşıyan kritik hal zemin özellikleri aracılığıyla zemin davranışı tanımlanabilmektedir.

Bekker yöntemiyle hesaplanması mümkün olmayan kayma batması büyüklüğü, simülasyon modeli vasıtasıyla tespit edilmiş, kayma batmasındaki artışa bağlı olarak seyir direncinin arttığı ve cer kuvvetinin yanında seyir direncinin de kayma oranının bir fonksiyonu olduğu gösterilmiştir. Kayma batmasının, kayma oranına bağlı olarak seyir direncine %45'e varan oranlarda ilave bir artış getirdiği gözlenmiştir.

Palet sisteminin zemin üstünde yarattığı etkiyi yansıtan bir simülasyon modeli oluşturularak, seyir direnci, cer kuvveti ve çeki kuvvetinin değişimi kayma oranına bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu simülasyon modeli bir M113 zırhlı personel taşıyıcısına uyarlanarak, palet sistemi için elde edilen performans değerleri, deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Kritik hal modeli yardımıyla elde edilen bu değerlerin, özellikle verimli çalışma bölgesinde gerçek durumu Bekker yöntemine kıyasla daha iyi yansıttıkları görülmüştür.

## Semboller

$Q$	:Biçim değiştirme gerilmesi (kPa)
$n$	:Deformasyon üssü
$P$	:Hidrostatik basınç(kPa)
$\tau$	:Kayma gerilmesi (kPa)
$j$	:Kayma yer değiştirmesi (m)
$i$	:Kayma oranı
$K$	:Kesme deformasyon katsayısı
$c$	:Kohezyon (kPa)
$M$	:Kritik halde sürtünme özelliği
$\sigma$	:Normal gerilme (kPa)
$b$	:Plaka genişliği (m)

$l$	:Plaka uzunluğu (m)
$p$	:Plaka üstündeki basınç (kPa)
$e$	:Zemindeki boşluk oranı
$\kappa$	:Zeminin elastik sıkışma özelliği
$k_c$	:Zeminin kohezif modülü ( $kN/m^{n+1}$ )
$\lambda$	:Zeminin plastik sıkışma özelliği
$\phi$	:Zeminin iç sürtünme açısı ( $^{\circ}$ )
$k_{\phi}$	:Zeminin sürtünme modülü ( $kN/m^{n+2}$ )

## Kaynaklar

- Apostolopoulos,D., (2001). Analytical configuration of wheeled robotic locomotion, *PhD Thesis*, Carnegie Mellon University, Pennsylvania.
- Bekker, M. G., (1956). *Theory of Land Locomotion*, University of Michigan Press, Ann Arbor, U.S.A.
- Calladine, C.R., (1969). *Engineering Plasticity*, Pergamon Press Ltd., London.
- Chang, B. S., Baker, W. J., (1973). Soil parameters to predict the performance of off-road vehicles, *Journal of Terramechanics*, **9**, 2, 13-31.
- Cheng, Y. P., Nakata, Y., Bolton, M.D., (2002). The modeling of soil plasticity, *Proceedings*, 3<sup>rd</sup> International Conference on Discrete Element Methods, 283-287, New Mexico.
- Chi, L., Tessier, S., Mc.Kyes, E., Lague, C., (1993). Modeling mechanical behavior of agricultural soils, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **36**, 6, 1563-1570.
- Kurtay, T., (1970). Reaction of soil to tractive loading, *PhD Thesis*, University of Newcastle-Upon-Tyne, Great Britain.
- Kurtay,T., (1975). Toprak araç mekaniğinin teorisinde kritik hal toprak mekaniği ve sonlu elemanlar yöntemi ile yeni bir çözüm yolu, *Doçentlik tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, İstanbul.
- Kurtay, T., Reece, A.R., (1970). Plasticity theory and critical state soil mechanics, *Journal of Terramechanics*, **7**, 3-4.
- Le, A. T., (1999). Modelling and controlling of tracked vehicles, *PhD Thesis*, University of Sydney, Australia.
- Ma, Z., Perkins, C.N., (1999). Modeling of track-wheel-terrain interaction for dynamic simulation of tracked vehicle systems, *Proceedings*, 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences, 1-12, Las Vegas.
- Onafeko, O., Reece, A.R., (1967). Soil stresses and deformation beneath rigid wheels, *Journal of Terramechanics*, **4**, 1, 59-80.
- Shibly, H., Iagnemma, K., Dubowsky, S., (2005). An equivalent soil mechanics formulation for rigid wheels in deformable terrain, with application to planetary exploration rovers, *Journal of Terramechanics*, **42**, 1-13.
- Shmulevich, I., Osetinsky, A., (2003). Traction performance of a pushed/pulled drive wheel, *Journal of Terramechanics*, **40**, 33-50.
- Schofield, A.N., Wroth, C.P., (1968). *Critical State Soil Mechanics*, Mc Graw Hill Comp., London.
- Stankiewicz, A., Pamin J., (2002). A Gradient-Dependent Modified Cam-Clay Model, *Proceedings*, 5<sup>th</sup> World Congress on Computational Mechanics, 1-10, Vienna.
- Wong, J.Y., (1993). *Theory of Ground Vehicles*, John Wiley & Sons, New York.